

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-244896

(43)Date of publication of application : 07.09.2001

(51)Int.Cl.

H04B 10/152
H04B 10/142
H04B 10/04
H04B 10/06
G02F 1/035

(21)Application number : 2000-384208

(71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 18.12.2000

(72)Inventor : MASUDA KOICHI
YAMAMOTO HIROAKI

(30)Priority

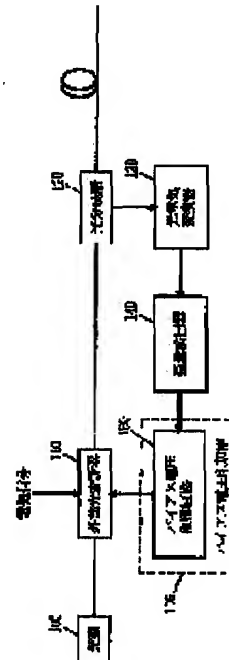
Priority number : 11367166 Priority date : 24.12.1999 Priority country : JP

(54) OPTICAL TRANSMISSION DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To make a bias voltage applied to an external optical modulator precisely follow the optimum bias variation caused by the DC drift as to an optical transmission device equipped with the external optical modulator which modules the carrier light from a light source with an electric signal.

SOLUTION: A bias voltage control circuit 150 controls the bias voltage that a bias application unit 105 applies to the external optical modulator 110 so that the quantity of secondary distortion that is generated at the light signal outputted from the external modulator 110 becomes minimum.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

2

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開 2001-244896

(P 2001-244896A)

(43) 公開日 平成13年9月7日 (2001. 9. 7)

(51) Int. Cl. 7	識別記号	F I	テーマコード (参考)
H 0 4 B	10/152	G 0 2 F	1/035
	10/142	H 0 4 B	9/00
	10/04		L
	10/06		
G 0 2 F	1/035		
審査請求 未請求 請求項の数 1 1		O L	(全 1 7 頁)

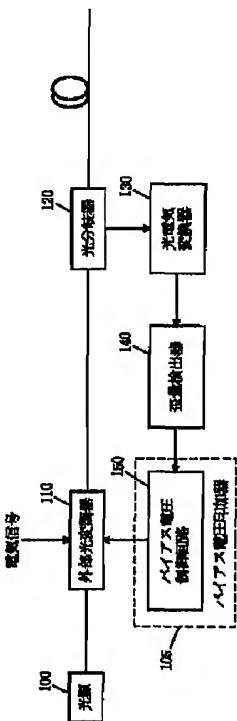
(21) 出願番号	特願2000-384208 (P2000-384208)	(71) 出願人	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地
(22) 出願日	平成12年12月18日 (2000. 12. 18)	(72) 発明者	増田 浩一 大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器 産業株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平11-367166	(72) 発明者	山本 浩明 大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器 産業株式会社内
(32) 優先日	平成11年12月24日 (1999. 12. 24)	(74) 代理人	100098291 弁理士 小笠原 史朗
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 光送信装置

(57) 【要約】

【課題】 光源からの搬送光を電気信号で変調する外部光変調器を備えた光送信装置において、外部光変調器に印加するバイアス電圧を、DCドリフトによる最適バイアスの変動に、精度よく追従させる。

【解決手段】 バイアス電圧制御回路150は、バイアス電圧印加器105が外部光変調器110に印加するバイアス電圧を、外部光変調器110から出力される光信号に生じる二次歪の量が最小となるように制御する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 搬送光を電気信号で外部変調して送信する光送信装置であって、
搬送光を出力する光源、
前記光源から出力される搬送光を電気信号で変調する外部光変調器、
前記外部光変調器にバイアス電圧を印加するバイアス電圧印加器、および前記バイアス電圧印加器が前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を、当該外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量に基づいて制御するバイアス電圧制御手段を備える、光送信装置。

【請求項 2】 前記バイアス電圧制御手段は、
前記外部光変調器から出力される光信号を二分岐する光分岐器、
前記光分岐器から出力される一方の光信号を電気信号に変換する光電気変換器、
前記光電気変換器が出力する電気信号から特定帯域内の成分を抽出して、当該成分のレベルを測定することにより、前記外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量を検出する歪量検出器、および前記バイアス電圧印加器が前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を、前記歪量検出器によって検出される歪量が最小となるように制御するバイアス電圧制御回路を含む、請求項 1 に記載の光送信装置。

【請求項 3】 前記バイアス電圧制御回路は、
前記バイアス電圧印加器が前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加または減少させ、
前記歪量検出器によって検出される歪量が、前記バイアス電圧増加または減少の前後で増加したか減少したかを判定し、その判定結果によって、次にバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定することを特徴とする、請求項 2 に記載の光送信装置。

【請求項 4】 前記バイアス電圧制御手段は、
前記光電気変換器が出力する電気信号の電力を測定することにより、前記外部光変調器から出力される光信号のパワーを検出する光パワー検出器をさらに含み、
前記バイアス電圧制御回路は、
前記光パワー検出器が検出した光パワーに基づいて、前記バイアス電圧印加器が前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定することを特徴とする、請求項 2 に記載の光送信装置。

【請求項 5】 前記外部光変調器は、
前記光源からの搬送光を二分岐して導く 2 つの導波路、
各前記導波路によって導かれた光信号を相互に結合する光結合器、および前記光結合器から出力される 2 つの光信号を出力する第 1 および第 2 のポートを含み、
前記バイアス電圧制御手段は、
前記第 2 のポートから出力される光信号を電気信号に変

換する光電気変換器、

前記光電気変換器が出力する電気信号から特定帯域内の成分を抽出して、当該成分のレベルを測定することにより、前記第 2 のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量を検出する歪量検出器、および前記バイアス電圧印加器が前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を、前記歪量検出器によって検出される歪量が、予め記憶している基準値と一致するように制御するバイアス電圧制御回路を含む、請求項 1 に記載の光送信装置。

10 【請求項 6】 前記バイアス電圧制御回路は、
前記第 1 のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量が最小となるようなバイアス電圧を、前記バイアス電圧印加器が前記外部光変調器に印加しているとき、前記歪量検出器によって検出される歪量を、前記基準値として記憶することを特徴とする、請求項 5 に記載の光送信装置。

【請求項 7】 光源からの搬送光を電気信号で変調する外部光変調器を備えた光送信装置において、当該外部光変調器に印加するバイアス電圧を制御する方法であって、
20 前記外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量を測定する歪量測定ステップ、
前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を、前記歪量測定ステップで測定した歪量が最小となるように制御するバイアス電圧制御ステップを備える、バイアス電圧制御方法。

【請求項 8】 前記バイアス電圧制御ステップは、
前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加または減少させるバイアス電圧増加／減少ステップ、
30 前記歪量検出ステップで検出される歪量が、前記バイアス電圧増加／減少ステップの前後で増加したか減少したかを判定し、その判定結果によって、次にバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定するステップを含む、請求項 7 に記載のバイアス電圧制御方法。

【請求項 9】 前記外部光変調器から出力される光信号のパワーを検出する光パワー検出ステップをさらに備え、
前記バイアス電圧制御ステップは、
40 前記光パワー検出ステップで検出した光パワーに基づいて、前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定するステップを含む、請求項 7 に記載のバイアス電圧制御方法。

【請求項 10】 前記外部光変調器は、
前記光源からの搬送光を二分岐して導く 2 つの導波路、
各前記導波路によって導かれた光信号を相互に結合する光結合器、および前記光結合器から出力される 2 つの光信号を出力する第 1 および第 2 のポートを含み、
50 前記バイアス電圧制御ステップは、

前記第2のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量を検出する歪量検出ステップ、および前記外部光変調器に印加するバイアス電圧を、前記歪量検出ステップで検出される歪量が、予め記憶している基準値と一致するように制御するバイアス電圧制御ステップを含む、請求項7に記載のバイアス電圧制御方法。

【請求項11】 前記バイアス電圧制御ステップは、前記第1のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量が最小となるような第1ポート側の最適バイアス電圧を前記外部光変調器に印加している初期状態のとき、前記歪量検出ステップで検出される歪量を前記基準値として記憶するステップを含む、請求項10に記載のバイアス電圧制御方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光送信装置に関し、より特定的には、外部光変調器を用いた光送信装置であって、外部光変調器にバイアス電圧を印加する際、その印加バイアス電圧をDCドリフトによる最適バイアス電圧変動に追従させるバイアス電圧制御を行うことができる光送信装置に関する。

【0002】

【従来の技術】従来の光通信システムに用いられている光送信装置では、光源を構成するレーザーダイオードに注入する電流を入力信号により直接変調することによって、その入力信号で変調された光信号を出力する変調方式が採用されていた。しかし、この変調方式では、レーザーダイオードに注入される電流が変化するため、レーザーダイオードのチャープ特性により、その発振波長が変化する現象が生じる。このようなレーザーダイオードから出力される光信号を長距離伝送すると、光ファイバ中における波長分散の影響によって光信号の波形劣化が生じ、信号の特性が劣化するという問題が生じる。

*【0003】また、将来の移動体通信としては、伝送レートを大幅に拡大するために帯域の確保が容易な、高い周波数（特に、ミリ波帯）を利用することが検討されている。ミリ波帯の信号は、同軸ケーブルを伝送路として用いた場合、伝送路での損失が非常に大きいため、数10m間隔で増幅器が必要になる。実際にシステムを構築する際、この点がコストや信頼性の面から問題となる。このような観点から、ミリ波帯の信号伝送には、損失が小さいという特徴を有する光ファイバを利用することが必須である。しかしながら、現在市販されているレーザーダイオードの周波数応答特性は、10GHz程度であり、ミリ波帯のような非常に高い周波数には応答しないため、これらのレーザーダイオードを直接変調することは不可能であった。

【0004】そこで、長距離伝送を行ったり、ミリ波など周波数の高い信号を伝送する場合には、原理的にチャープが生じにくく、高い周波数の信号まで応答することが可能なマッハツェンダー型の外部光変調器を備えた光送信装置を用いることが提案されている。

【0005】図11に、マッハツェンダー型の外部光変調器（以下、MZ型光変調器と表記する）の構成を示す。このMZ型光変調器には、光源から出力された搬送光が入力され、2つの光導波路に向けて分岐される。結晶基板上に設けられた電極に電圧が加えられることにより電界が生じると、導波路中の屈折率が変化し、その結果、導波路中を伝搬する光の位相が変化する。なお、図11には、一方の光導波路を通過する光のみに位相変調を施すような構成が示されている。各々の光導波路からの光は互いに合波され、MZ型光変調器から光信号が出力される。こうして出力される光信号の光電界は、次式で表される。

【0006】

【数1】

$$\begin{aligned} E_{Ex-Mod}(V, t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(i\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp i\left\{\omega t + \phi(V, t)\right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left\{i\left(\omega t + \frac{\phi(V, t)}{2}\right)\right\} \exp\left\{-\frac{i\phi(V, t)}{2}\right\} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left\{i\left(\omega t + \frac{\phi(V, t)}{2}\right)\right\} \exp\left\{\frac{i\phi(V, t)}{2}\right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left\{i\left(\omega t + \frac{\phi(V, t)}{2}\right)\right\} \left[\exp\left\{-\frac{i\phi(V, t)}{2}\right\} + \exp\left\{\frac{i\phi(V, t)}{2}\right\}\right] \\ &= \sqrt{2} \cos\left\{\phi(V, t)/2\right\} \exp\left\{i\left(\omega t + \frac{\phi(V, t)}{2}\right)\right\} \quad \dots (1) \end{aligned}$$

【0007】但し、

【数2】

$$\begin{aligned} \phi(V, t) &= \phi_{DC}(V) + \phi_{RF}(t) \\ &= \phi_{DC}(V) + m \cos \omega_f t \quad \dots (2) \end{aligned}$$

とする。Vはバイアス電圧、mは位相変調度、 ω_f はア

ナログ信号の角周波数を示している。この光電界を用いて、MZ型光変調器から出力される光信号パワーは、次式で与えられる。

【0008】

【数3】

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= E_{Ex-Mod}(V, t) \times E_{Ex-Mod}^*(V, t) \\
 &= 2\cos^2(\phi(V, t)/2) \\
 &= 1 + \cos\phi(V, t) \\
 &= 1 + \cos(\phi_{DC}(V) + m\cos\omega_f t) \\
 &= 1 + \cos\phi_{DC}(V)\cos(m\cos\omega_f t) - \sin\phi(V)\sin(m\sin\omega_f t) \\
 &= 1 + \cos\phi_{DC}(V) \{J_0(m) + 2J_2(m)\cos(2\omega_f t) + \dots\} \\
 &\quad - \sin\phi_{DC}(V) \{2J_1(m)\cos(\omega_f t) + 2J_3(m)\cos(3\omega_f t) + \dots\} \dots (3)
 \end{aligned}$$

【0009】この時のバイアス電圧と光出力との関係を、図12に示す。図12において、横軸はバイアス電圧を、縦軸は光信号の出力パワーを表す。このように、MZ型光変調器から出力される光信号のパワーは、MZ型光変調器に印加されるバイアス電圧に対して正弦波の特性を示す。

【0010】しかしながら、MZ型光変調器では、経時変化や温度変化など種々の条件により、前述したようなバイアス電圧と光出力との関係が初期状態から変動する現象が生じる。この現象は、DCドリフトと呼ばれている。このDCドリフト現象を、図13に示す。

【0011】図13に示すようなDCドリフト現象が生じると、バイアス電圧によって決定される位相状態が初期の位相状態から変動するために、MZ型光変調器から出力される光信号のパワーは変化し、信号特性の劣化が生じる。なお、初期の位相状態の時のバイアス電圧を最適バイアス電圧（図中のVb）と定義し、以降においては、このように表記する。

【0012】外部光変調器を用いた従来の光送信装置では、DCドリフトによる最適バイアス電圧変動に追従するために、外部光変調器から出力される光信号のパワー（これは、光信号を光電気変換し、得られた電気信号の直流成分、つまり電力を測定することにより求まる）に基づいて、外部光変調器に印加するバイアス電圧を制御していた。より具体的には、バイアス電圧が最適に設定された初期状態において、出力光信号のパワーを事前に計測し、その値（基準値）記憶しておく。以降、出力光信号のパワーを監視して、光信号のパワーが基準値と等しくなるように、印加バイアス電圧を制御する。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、印加バイアス電圧の最適バイアス電圧からの変動量に対し、出力光信号のパワーの変化量は、非常に小さい。そのため、出力光信号のパワーに基づいて、印加バイアス電圧を最適バイアス電圧の変動に高い精度で追従させることは、極めて困難である。

【0014】ここで、印加バイアス電圧の最適バイアス電圧からの変動量と、出力光信号のパワーの変動量との関係について、数式を用いて説明する。出力光信号のパワーPdcは、上式（3）の結果を利用すると、次式

（4）で表すことができる。

【数4】

$$P_{dc} = 1 + J_0(m)\cos(\phi(V)) \dots (4)$$

【0015】最適バイアス電圧は、一般に初期位相状態が $\pi/2$ の時であり、バイアス電圧がDCドリフトにより変動することで生じる位相変化量を ϕ とすると、その時の位相状態は、

【数5】

$$\phi(V) = \frac{\pi}{2} + \Psi(V) = \frac{\pi}{2} + \frac{2}{\pi} \frac{V}{V_\pi} \dots (5)$$

と表すことができる。

【0016】上式（4）および（5）から、印加バイアス電圧の最適バイアス電圧からの変動量に対する出力光信号のパワーの変動量を求めると、次のような関係となる。

【数6】

$$\begin{aligned}
 dP_{dc} &= J_0\sin\phi(V)d\phi \\
 &= \frac{2J_0}{\pi} \frac{1}{V_\pi} \sin\phi(V)dV \dots (6)
 \end{aligned}$$

但し、

【数7】

$$d\phi = \frac{2}{\pi} \frac{1}{V_\pi} dV \dots (7)$$

【0017】DCドリフトによるバイアス電圧の変動は、瞬時的には非常に小さいので、

【数8】

$$\phi(V) \approx \frac{\pi}{2} \dots (8)$$

となり、

【数9】

$$\sin\phi(V) \approx 0 \dots (9)$$

と近似できる。

【0018】このため、上式（6）で示される、位相変化量に対する光信号パワーの変化量は、非常に小さく、従って、印加バイアス電圧の最適バイアス電圧からの変動に対して、出力光信号のパワーの変動は、ごくわずかなことがわかる。よって、従来のように、出力光信号のパワーに基づいてバイアス電圧を制御する場合、

20

30

40

50

制御の精度を上げることが難しい。

【0019】ベースバンドデジタル信号を送送する場合、バイアス電圧の制御精度が低いことは問題ではないが、アナログ信号、特に周波数多重された多チャンネル信号を送送する場合には、わずかなバイアス電圧の変動が二次歪（二次相互変調歪＝IM2）を増大させる。

【0020】図14は、図11の外部光変調器に印加されるバイアス電圧と、その外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量（以下、歪量）との関係を示す図である。図14に示すように、歪量は、バイアス電圧に対して最適バイアス電圧（図中のV_b）を対象軸とする二次関数的な特性を有している。つまり、歪量は、バイアス電圧が最適バイアス電圧からずれるにつれ、二 *

* 次関数的に増大する。そのため、ある一定量のバイアス電圧変動に対し、バイアス電圧が最適バイアス電圧近傍にあれば、歪量はあまり変化しないが、最適バイアス電圧からずれていけばいるほど、同じ量のバイアス変動に対する歪量の変化が顕著となる。

【0021】以下には、バイアス電圧と歪量との関係について、数式を用いて説明する。外部光変調器へ入力されるアナログ信号が2波の場合、外部光変調器からの出力光のパワーは、次のような式で表すことができる。但し、 ω_1 および ω_2 は、アナログ信号の角周波数とする。

【0022】

【数10】

$$P_{out} = 1 + \cos(\phi_{DC}(V) + m \sin \omega_1 t + m \sin \omega_2 t) \\ = 1 + \cos \phi_{DC}(V) \left[\begin{aligned} & J_0^2(m) + 2J_1^2(m) \{ \sin(\omega_1 + \omega_2)t + \sin(\omega_1 - \omega_2)t \} \\ & + 2J_0(m)J_2(m) \{ \cos 2\omega_1 t + \cos 2\omega_2 t \} \\ & + 2J_2^2(m) \{ \cos 2(\omega_1 + \omega_2)t + \cos 2(\omega_1 - \omega_2)t \} \end{aligned} \right] \\ - \sin \phi_{DC}(V) \left[\begin{aligned} & 2J_0(m)J_1(m) \{ \sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t \} \\ & + 2J_1(m)J_2(m) \{ \sin(\omega_1 + 2\omega_2)t + \sin(2\omega_1 + \omega_2)t \} \\ & + 2J_1(m)J_2(m) \{ \sin(2\omega_1 + \omega_2)t + \sin(2\omega_2 + \omega_1)t \} \end{aligned} \right] \\ \dots (10)$$

【0023】上式(10)において、 ω_1 および/または ω_2 を含む項がアナログ信号を表しており、その他の項は、外部光変調器の非線形性によって発生する歪成分である。ここで、アナログ信号と、IM2 および IM3 ※

30※（三次相互変調歪）との比は、それぞれ次の式で表される。

【0024】

【数11】

$$IM_2 = 20 \log \{ 2J_0(m)J_1(m) \sin \phi_{DC}(V) / 2J_1^2(m) \cos \phi_{DC}(V) \} \\ = 20 \log \left\{ \frac{J_1(m) \cos \phi_{DC}(V)}{J_0(m) \sin \phi_{DC}(V)} \right\} \dots (11)$$

【0025】

★ ★ 【数12】

$$IM_3 = 20 \log \{ 2J_2(m)J_1(m) \sin \phi_{DC}(V) / 2J_1(m)J_0(m) \sin \phi_{DC}(V) \} \\ = 20 \log \{ J_2(m) / J_0(m) \} \dots (12)$$

【0026】上式(11)および(12)からわかるように、IM2の値はバイアス電圧および位相変調度に、IM3は位相変調度に、それぞれ依存している。一方、前述したように、初期状態において、外部光変調器に印加されるバイアス電圧は、最適バイアス電圧V_bに設定される。すなわち、バイアス電圧と位相との関係は、

【数13】

$$\phi_{DC}(V_b) = \frac{\pi}{2} \dots (13)$$

を満足する。この時、上式(11)からわかるように、IM2は発生しない。

【0027】しかし、その後、外部光変調器が有するDCドリフト特性によって、バイアス電圧と位相との関係が、上式(13)を満足しなくなる。そこで、DCドリ

フトによる位相のずれと、その結果生じる歪の量について、以下のようにして計算を行った。

【0028】バイアス電圧 V が、最適バイアス電圧 V_b から (V だけ) ずれた時、 ϕ_{DC} は、次の式で表すことができる。

【数14】

$$\phi_{DC}(V_b - \Delta V) = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\Delta V}{V_\pi}\right) \quad \dots (14)$$

但し、 V_π は、外部光変調器の半波長電圧を表している。

【0029】上式 (14) を、位相ずれ Δx (%) を用いて表すと、

【数15】

$$\phi_{DC}(\Delta x) = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\Delta x}{100}\right) \quad \dots (15)$$

となる。

【0030】この式 (15) を上式 (11) に代入して、バイアス電圧の位相の、最適バイアス電圧の位相からのずれに対する IM_2 および CSO (複合二次歪) を計算した。この計算では、 $m=0.04$ とした。また、 IM_2 から CSO への換算では、60ch 伝送時において、最大のコンボジット数を 60 とし電力加算を行った。その計算結果を、図15に示す。

【0031】アナログ 60ch 伝送時には、 CSO が -60dBc 以下というスペックが要求されるが、その要求を満足するためには、図15からわかるように、バイアス電圧位相の最適バイアス電圧位相からのずれを、最大約 $\pm 0.03\%$ 程度に抑えなければならない。このような高精度の制御を、光信号のパワーの変化をモニターすることにより行うのは、困難である。

【0032】それゆえに、本発明の目的は、光源からの搬送光を電気信号で変調する外部光変調器を備えた光送信装置であって、外部光変調器に印加するバイアス電圧を、DCドリフトによる最適バイアスの変動に精度よく追従させることが可能であり、その結果、たとえ経年変化や温度変化のためにDCドリフトが発生しても、パワ

$$\begin{aligned} dIM_2 &= \left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 \frac{\cos \phi_{DC}(V) \sin^2 \phi_{DC}(V) \frac{2}{\pi V_\pi} dV - 2 \cos^2 \phi_{DC}(V) \frac{2}{\pi V_\pi} dV}{(\sin \phi_{DC}(V))^3} \\ &= \frac{2}{\pi V_\pi} \left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 \frac{\cos \phi_{DC}(V) \sin^2 \phi_{DC}(V) - 2 \cos^3 \phi_{DC}(V)}{(\sin \phi_{DC}(V))^3} dV \quad \dots (17) \end{aligned}$$

【0038】バイアス電圧の変動量に対する光信号のパワーの変動量と、同じバイアス電圧の変動量に対する IM_2 の変動量とを比較すると、光パワーの変動量は、上式 (6) に示すようにほぼ 0 であるのに対して、 IM_2 の変動量は、上式 (17) に示すように無限大となる。このため、光信号に生じる歪量をモニターしてバイアス電

一変動や歪量の増大が抑制された特性のよい光信号を送信することのできる光送信装置を実現することである。

【0033】

【課題を解決するための手段および発明の効果】第1の発明は、搬送光を電気信号で外部変調して送信する光送信装置であって、搬送光を出力する光源、光源から出力される搬送光を電気信号で変調する外部光変調器、外部光変調器にバイアス電圧を印加するバイアス電圧印加器、およびバイアス電圧印加器が外部光変調器に印加するバイアス電圧を、当該外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量に基づいて制御するバイアス電圧制御手段を備える。

【0034】上記第1の発明では、外部光変調器に印加するバイアス電圧 (以下、印加バイアス電圧) を、その外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量 (以下、歪量) に基づいて制御するので、印加バイアス電圧を、DCドリフトによる最適バイアスの変動に対して、精度よく追従させることが可能となる。その結果、たとえ経年変化や温度変化のためにDCドリフトが発生しても、パワー変動や歪量の増大が抑制された特性のよい光信号を送信することのできる光送信装置が実現される。

【0035】ここで、バイアス電圧の変動量に対する歪の変動量について、数式を用いて説明する。二次歪 (IM_2) は、上式 (11) によって示されており、その真数値は、

【数16】

$$IM_2 = \left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 \left\{ \frac{\cos \phi_{DC}(V)}{\sin \phi_{DC}(V)} \right\}^2 \quad \dots (16)$$

となる。

【0036】上式 (16) を偏微分することによって、下式 (17)、すなわちバイアス電圧の変動量に対する IM_2 の変動量を得ることができる。

【0037】

【数17】

圧を制御する方が、光信号のパワーをモニターしてバイアス電圧を制御するより、高い精度で制御を行うことが可能となる。

【0039】第2の発明は、第1の発明において、バイアス電圧制御手段は、外部光変調器から出力される光信号を二分岐する光分岐器、光分岐器から出力される一方

の光信号を電気信号に変換する光電気変換器、光電気変換器が出力する電気信号から特定帯域内の成分を抽出して、当該成分のレベルを測定することにより、外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量を検出する歪量検出器、およびバイアス電圧印加器が外部光変調器に印加するバイアス電圧を、歪量検出器によって検出される歪量が最小となるように制御するバイアス電圧制御回路を含む。

【0040】上記第2の発明では、印加バイアス電圧を、歪量が最小となるように制御する。

【0041】第3の発明は、第2の発明において、バイアス電圧制御回路は、バイアス電圧印加器が外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加または減少させ、歪量検出器によって検出される歪量が、バイアス電圧増加または減少の前後で増加したか減少したかを判定し、その判定結果によって、次にバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定することを特徴とする。

【0042】ここで、歪量は、印加バイアス電圧に対して最適バイアス電圧を対象軸とする二次関数的な特性を有している（図14参照）。そのため、DCドリフトによって最適バイアス電圧が変動した場合、印加バイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定しなければならない。

【0043】そこで、上記第3の発明では、最初、印加バイアス電圧を増加または減少させ、その前後で、歪量が増加したか減少したかを判定する。そして、その判定結果によって、次にバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定する。具体的には、印加バイアス電圧を増加（または減少）させたことにより歪量が減少すれば、次もバイアス電圧を増加（または減少）させる向きに制御を行い、もし歪量が増加すれば、次はバイアス電圧を減少（または増加）させる向きに制御を行う。

【0044】または、下記第4の発明のように、外部光変調器から出力される光信号のパワーをさらに検出し、その光パワーに基づいて、印加バイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定してもよい。具体的には、光パワーが増大した場合は印加バイアス電圧を増加させる向きに、光パワーが減少した場合には、印加バイアス電圧を減少させる向きに制御を行うと決定する。

【0045】あるいは、下記第5の発明のように、外部光変調器が2つの出力ポート（第1および第2のポート）を持っている場合、第2のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量を検出して、その歪量が基準値と一致するように、印加バイアス電圧を制御してもよい。基準値は、好ましくは、下記第6の発明のように、第1のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量が最小となるようなバイアス電圧（第1ポート側の最適バイ

アス電圧）を外部光変調器に印加しているとき（つまり初期状態のとき）、歪量検出器によって検出される歪量（第2のポート側の歪量）である。

【0046】第4の発明は、第2の発明において、バイアス電圧制御手段は、光電気変換器が出力する電気信号の電力を測定することにより、外部光変調器から出力される光信号のパワーを検出する光パワー検出器をさらに含み、バイアス電圧制御回路は、光パワー検出器が検出した光パワーに基づいて、バイアス電圧印加器が外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定することを特徴とする。

【0047】第5の発明は、第1の発明において、外部光変調器は、光源からの搬送光を二分岐して導く2つの導波路、各導波路によって導かれた光信号を相互に結合する光結合器、および光結合器から出力される2つの光信号を出力する第1および第2のポートを含み、バイアス電圧制御手段は、第2のポートから出力される光信号を電気信号に変換する光電気変換器、光電気変換器が出力する電気信号から特定帯域内の成分を抽出して、当該成分のレベルを測定することにより、第2のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量を検出する歪量検出器、およびバイアス電圧印加器が外部光変調器に印加するバイアス電圧を、歪量検出器によって検出される歪量が、予め記憶している基準値と一致するように制御するバイアス電圧制御回路を含む。

【0048】上記第4、第5の発明では、印加バイアス電圧を増加させるべきか減少させるべきかが即座にわかるので、DCドリフトによる最適バイアスの変動に、精度よく、しかも速やかに追従させることが可能となる。

【0049】なお、第4の発明では、印加バイアス電圧を増加させるべきか減少させるべきかは、光パワーの増減に基づいて決定される。一方、第5の発明では、第2のポート側の歪量に基づいて決定されるので、第2のポート側の歪量をモニタするだけでよく、第4の発明に比べ、装置の構成がより単純である（バイアス電圧制御処理がより簡単である）。

【0050】第6の発明は、第5の発明において、バイアス電圧制御回路は、第1のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量が最小となるようなバイアス電圧を、バイアス電圧印加器が外部光変調器に印加しているとき、歪量検出器によって検出される歪量を、基準値として記憶することを特徴とする。

【0051】第7の発明は、光源からの搬送光を電気信号で変調する外部光変調器を備えた光送信装置において、当該外部光変調器に印加するバイアス電圧を制御する方法であって、外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量を測定する歪量測定ステップ、外部光変調器に印加するバイアス電圧を、歪量測定ステップで測定した歪量が最小となるように制御するバイアス電圧

制御ステップを備える。

【0052】第8の発明は、第7の発明において、バイアス電圧制御ステップは、外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加または減少させるバイアス電圧増加／減少ステップ、歪量検出ステップで検出される歪量が、バイアス電圧増加／減少ステップの前後で増加したか減少したかを判定し、その判定結果によって、次にバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定するステップを含む。

【0053】第9の発明は、第7の発明において、外部光変調器から出力される光信号のパワーを検出する光パワー検出ステップをさらに備え、バイアス電圧制御ステップは、光パワー検出ステップで検出した光パワーに基づいて、外部光変調器に印加するバイアス電圧を増加させる向きに制御するか、減少させる向きに制御するかを決定するステップを含む。

【0054】第10の発明は、第7の発明において、外部光変調器は、光源からの搬送光を二分岐して導く2つの導波路、各導波路によって導かれた光信号を相互に結合する光結合器、および光結合器から出力される2つの光信号を出力する第1および第2のポートを含み、バイアス電圧制御ステップは、第2のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量を検出する歪量検出ステップ、および外部光変調器に印加するバイアス電圧を、歪量検出ステップで検出される歪量が、予め記憶している基準値と一致するように制御するバイアス電圧制御ステップを含む。

【0055】第11の発明は、第10の発明において、バイアス電圧制御ステップは、第1のポートから出力される光信号に生じる二次歪の量が最小となるような第1ポート側の最適バイアス電圧を外部光変調器に印加している初期状態のとき、歪量検出ステップで検出される歪量を基準値として記憶するステップを含む。

【0056】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。

(第1の実施形態) 図1は、本発明の第1の実施形態に係る光送信装置の構成を示すブロック図である。図1において、光送信装置は、光源100と、バイアス電圧印加器105と、外部光変調器110と、光分岐器120と、光電気変換器130と、歪量検出器140とを備えている。バイアス電圧印加器105は、バイアス電圧制御回路150を含む。

【0057】光源100は、搬送光を出力する。バイアス電圧印加器105は、バイアス電圧を印加する。外部光変調器110は、バイアス電圧印加器105によるバイアス電圧の印加を受けた状態で、光源100から出力される搬送光と、電気信号とが入力され、搬送光をバイアスされた電気信号に応じて強度変調して、光信号を出力する。ここで、外部光変調器110に入力される電気

信号は、複数のアナログ信号が周波数多重された信号である。

【0058】光分岐器120は、外部光変調器110から出力される光信号を分岐する。光分岐器120から出力される一方の光信号は、光伝送路を通じ、図示しない受信装置へと伝送される。光分岐器120から出力される他方の光信号は、光電気変換器130へと入力され、光電気変換器130によって電気信号に変換される。

【0059】光電気変換器130から出力される電気信号が歪量検出器140に与えられ、歪量検出器140は、その電気信号に基づいて、外部光変調器110から出力される光信号に含まれる二次歪の量（以下、歪量）を検出する。歪量検出器140によって検出された歪量がバイアス電圧制御回路150に与えられ、バイアス電圧制御回路150は、その歪量が最小となるように、バイアス電圧印加器105が外部光変調器110に印加するバイアス電圧（以下、印加バイアス電圧）を制御する。

【0060】上記の歪量検出器140は、例えば、電気信号から所望の周波数帯域内にある成分だけを抽出するフィルタと、その成分のレベル（電圧）を測定する回路と、そのレベルから光パワーを算出する回路とによって実現される。歪量検出器140は、典型的には、二次歪の生じる1つの帯域内にある成分を抽出する。電気信号に含まれる各アナログ信号の周波数が既知であれば、生じる二次歪の周波数を予め算出可能なので、その周波数近傍の成分だけを透過させるようなフィルタを選べばよい。

【0061】なお、図2に示すように、互いに周波数の異なるいくつかの二次歪（10～12）が生じるときには、参照番号13で示されるような透過特性を持つフィルタを用いて、最もレベルの高い二次歪10を抽出するのが好ましい。この場合、二次歪10の最大レベルが、歪量として歪量検出器140から出力される。

【0062】または、上記二次歪10の場合と同様に、二次歪11、12のレベルもそれぞれ測定し、測定した複数のレベルを互いに加算してもよい。この場合、複数の二次歪10～12の合計レベルが、歪量として歪量検出器140から出力される。

【0063】以上のように構成された光送信装置の動作について、以下に説明する。光源100から出力される光は、外部光変調器110に入力される。一般に、外部光変調器110へ入力する光は、偏波面の調整を行うことによって、TEモードもしくはTMモードのどちらか一方だけに制限される。この調整は、偏波コントローラを光源100と外部光変調器110との間に挿入して、偏波コントローラによって偏波面を調整する方法や、光源100と外部光変調器110との間のファイバに偏波保持ファイバを用いる方法などがある。図1には、この偏波面の調整を行う偏波コントローラや偏波面保持フ

イバについては、明記されていない。

【0064】外部光変調器110は、バイアス電圧印加器105によりバイアス電圧を印加されており、入力される電気信号に応じて入力光を強度変調し、光信号を出力する。この出力光信号は、光分岐器120で分岐され、その分岐された一方の光信号は、光電気変換器130で電気信号に変換される。光電気変換器130から出力された電気信号は、歪量検出器140に入力される。

【0065】歪量検出器140は、電気信号に含まれる交流成分から所望の帯域の成分を抽出してそのレベルを測定する機能を有しており、測定したレベルに基づいて所定の演算を行うことにより、外部光変調器110から出力される光信号に生じる歪量を検出する。この所望の帯域は、二次歪が生じる帯域であれば特に限定はしないが、そこで生じる歪量の多い周波数帯域に設定することが望ましい。

【0066】歪量検出器140から出力される信号は、バイアス電圧印加器105内のバイアス電圧制御回路150に入力される。バイアス電圧制御回路150は、歪量検出器140において検出される歪量が最小となるように、バイアス電圧印加器105が外部光変調器110に印加するバイアス電圧（印加バイアス電圧）の制御を行う。このような構成とすることによって、比較的簡単な制御方法によって、バイアス電圧の制御精度を向上させることができ、印加バイアス電圧を常に、歪量が最小となるバイアス電圧（最適バイアス電圧）に保つことが可能となる。

【0067】ここで、バイアス電圧制御回路150が行うバイアス電圧制御処理について、詳しく説明する。この処理は、従来同様、DCドリフトによる最適バイアス電圧の変動に、バイアス電圧印加器105が外部光変調器110に印加するバイアス電圧（印加バイアス電圧）を追従させる処理である。従来と異なるのは、光信号のパワー（すなわち直流成分）が一定となるように印加バイアス電圧を制御することによってではなく、光信号に生じる歪量が最小となるように印加バイアス電圧を制御することによって、印加バイアス電圧を最適バイアス電圧の変動に追従させている点だけである。

【0068】図3は、図1のバイアス電圧制御回路150が行う処理を視覚的に示した図である。また、図4は、図1のバイアス電圧制御回路150が行う処理を記述したフローチャートである。図3に示されているバイアス電圧と歪量との関係は、図14に示されているものと同様である（従来技術の欄を参照）。

【0069】図3、図4において、バイアス電圧制御回路150へは、歪量検出器140が検出した歪量 m_0 が与えられる。バイアス電圧制御回路150は、最初、印加バイアス電圧を、予め決められた電圧だけ増加させる（ステップS101）。次いで、歪量検出器140から、印加バイアス増加後の歪量（ m_1 ）が与えられ、応

じて、バイアス電圧制御回路150は、印加バイアス増加前後の歪量（ m_0 および m_1 ）を互いに比較することにより、歪量の変化が予め決められたしきい値よりも大きいかなかを判定する（ステップS102）。その判定結果が否定の場合、ステップS107へと進む。

【0070】ステップS102の判定結果が肯定の場合、バイアス電圧制御回路150は、歪量が減少したかなかを判定する（ステップS103）。その判定結果が肯定の場合、ステップS101～S103が反復して行われる。すなわち、バイアス電圧制御回路150は、印加バイアス電圧を再び増加させ、次いで、歪量検出器140から与えられる印加バイアス電圧増加後の歪量（ m_2 ）を増加前の歪量（ m_1 ）と比較して、歪量の変化がしきい値よりも大きいかなかを判定する。その判定結果が否定の場合はステップS107へと進むが、肯定の場合には、ステップS103の判定（歪量が減少したかなかの判定）が行われ、その判定結果が肯定の場合、再度、ステップS101～S103が反復して行われることになる。

20 【0071】ステップS103の判定結果が否定の場合、バイアス電圧制御回路150は、印加バイアス電圧を、予め決められた電圧だけ減少させ（ステップS104）、その後、歪量の変化（図中、 m_1' から m_0 への変化）がしきい値よりも大きいかなかを判定する（ステップS105）。そして、その判定結果が否定の場合、ステップS107へと進む。

30 【0072】ステップS105の判定結果が肯定の場合には、歪量が減少したかなかを判定する（ステップS106）。その判定結果が肯定の場合、ステップS104～S106が反復して行われる。すなわち、バイアス電圧制御回路150は、印加バイアス電圧を再び減少させ、次いで、歪量検出器140から与えられる印加バイアス電圧減少後の歪量（ m_1 ）を減少前の歪量（ m_0 ）と比較して、歪量の変化がしきい値よりも大きいかなかを判定する。その判定結果が否定の場合はステップS107へと進むが、肯定の場合には、ステップS106の判定（歪量が減少したかなかの判定）が行われ、その判定結果が肯定の場合、再度、ステップS104～S106が反復して行われることになる。

40 【0073】ステップS107では、バイアス電圧制御回路150は、印加バイアス電圧を一定期間、現在の値のまま保持する。その後、処理を継続するかなかが判断され、その判断結果が肯定の場合には、ステップS101に戻って上記と同様の処理が反復して行われ、否定の場合は、処理を終了する。

50 【0074】バイアス電圧制御回路150が上記のような処理を行うことによって、たとえ経年変化や温度変化等が起こっても、バイアス電圧印加器105が外部光変調器110に印加するバイアス電圧を、DCドリフトによる最適バイアス電圧の変動に追従させることが可能と

なる。

【0075】なお、上記の処理では、バイアス電圧を増加（または減少）させる前後での歪量を互いに比較して、歪量の変化がしきい値より大きいかなんかを判定し、歪量変化がしきい値より大きい場合に、歪量変化がしきい値以下となるまでバイアス電圧を増加（または減少）させた。このような処理の他にも、例えば、次のような処理を行ってもよい。

【0076】印加バイアス電圧が最適バイアス電圧に等しい初期状態において、歪量検出器140から与えられる歪量を事前に計測して、その値（基準値）をバイアス電圧制御回路150に記憶させておく。以降、バイアス電圧制御回路150は、歪量検出器140から与えられる歪量が基準値と等しくなるように、印加バイアス電圧を制御する。すなわち、バイアス電圧制御回路150は、歪量検出器140から与えられる歪量を基準値と比較して、歪量が基準値よりも大きくなった場合に、印加バイアス電圧を増加（または減少）させる。

【0077】（第2の実施形態）図5は、本発明の第2の実施形態に係る光送信装置の構成を示すブロック図である。図5において、光送信装置は、光源200と、バイアス電圧印加器205と、外部光変調器210と、光分岐器220と、光電気変換器230と、歪量検出器240と、光パワー検出器250とを備えている。バイアス電圧印加器205は、バイアス電圧制御回路260を含む。光源200、バイアス電圧印加器205、外部光変調器210、光分岐器220、光電気変換器230および歪量検出器240は、図1と同じものであり、説明を省略する。

【0078】光電気変換器230から出力される電気信号が光パワー検出器250に与えられ、光パワー検出器250は、その電気信号の電力（すなわち、その信号に含まれる直流成分）を測定することによって、外部光変調器210から出力される光信号のパワーを検出する。

【0079】歪量検出器240によって検出された歪量がバイアス電圧制御回路260に与えられ、バイアス電圧制御回路260は、その歪量が最小となるように、バイアス電圧印加器205が外部光変調器210に印加するバイアス電圧を制御する。その際、光パワー検出器250によって検出された光パワーがバイアス電圧制御回路260に与えられ、バイアス電圧制御回路260は、その光パワーに基づいて、印加バイアス電圧を増加させるか、減少させるかを決定する。

【0080】以上のように構成された光送信装置の動作について、以下に説明する。光源200から出力される光は、外部光変調器210に入力される。第1の実施形態で述べたように、外部光変調器210へ入力する光信号は、TEモードもしくはTMモードのどちらか一方だけに制限されるように、偏波面の調整を行うことが一般的である。図5には、この偏波面の調整を行う偏波コン

トローラや偏波保持ファイバについては、明記されていない。

【0081】外部光変調器210は、バイアス電圧印加器205によりバイアス電圧を印加されており、入力される電気信号に応じて入力光を強度変調し、光信号を出力する。この出力光信号は、光分岐器220で分岐され、その分岐された一方の光信号は、光電気変換器230で電気信号に変換される。光電気変換器230から出力された電気信号は、直流成分と交流成分とを含んでおり、光パワー検出器250および歪量検出器240に入力される。光パワー検出器250は、光電気変換器230から出力される電気信号の電力（直流成分）を測定する機能を有し、測定した電力に基づいて所定の演算を行うことにより、外部光変調器210から出力される光信号のパワーを検出する。

【0082】一方、歪量検出器240は、電気信号に含まれる交流成分から所望の帯域の成分を抽出してそのレベルを測定する機能を有しており、測定したレベルに基づいて所定の演算を行うことにより、外部光変調器210から出力される光信号に生じる歪量を検出する。この所望の帯域は、二次歪が生じる帯域であれば特に限定はしないが、そこで生じる歪量の多い周波数帯域に設定することが望ましい。

【0083】それぞれの検出器から出力される信号は、バイアス電圧制御回路260に入力される。バイアス電圧制御回路260は、バイアス電圧印加器205が外部光変調器210に印加するバイアス電圧を、以下のような手順で、外部光変調器210から出力される光信号に生じる歪量が最小となる電圧（その時点での最適バイアス電圧）と一致するように制御する。

【0084】バイアス電圧制御回路260は、光パワー検出器250から入力された信号を、基準信号（すなわち、印加バイアス電圧が最適バイアス電圧に設定された初期状態での光パワーを示す信号）と比較し、比較結果に応じて印加バイアス電圧の増減を決定する。

【0085】例えば、外部光変調器210に印加されるバイアス電圧と、そこから出力される光信号のパワーとの関係が、図12（従来の技術を参照）に示される特性を有する場合、光パワー検出器250から与えられる信号レベルが基準信号よりも大きい時には、印加バイアス電圧を増加させるように制御する。一方、光パワー検出器250から与えられる信号レベルが基準信号よりも小さい場合、印加バイアス電圧を減少させるように制御する。このように、バイアス電圧制御回路260は、まず、光パワー検出器250から与えられる信号、すなわち外部光変調器210の出力光パワーに基づいて、印加バイアス電圧を増加させる向きに制御するか減少させる向きに制御するかを決定する。そして、歪量検出器240から与えられる信号値（外部光変調器210の出力光信号に生じる歪量）が最小となるように、印加バイアス

電圧の微調整を行う。

【0086】つまり、外部光変調器 210 に印加されるバイアス電圧と、外部光変調器 210 から出力される光信号において生じる歪量とは、図 14（従来の技術を参照）に示すように、最適バイアス電圧に対して対称の関係を有しているため、歪量の変動を観測するだけでは、バイアス電圧の増減を即座に判断することができない。そのため、例えば第 1 の実施形態で説明したような複雑な処理が必要となるが、本実施形態のような構成とすることによって、比較的簡単な処理によって、制御精度を向上することが可能となり、印加バイアス電圧を常に、歪量が最小となるバイアス電圧（最適バイアス電圧）に保つことが可能となる。

【0087】ここで、バイアス電圧制御回路 260 が行うバイアス電圧制御処理について、詳しく説明する。この処理は、第 1 の実施形態同様、歪量検出器 240 から与えられる歪量が最小となるように印加バイアス電圧を制御することによって、最適バイアス電圧の変動に印加バイアス電圧を追従させる処理である。第 1 の実施形態と異なるのは、バイアス電圧制御を開始するのに先だって、印加バイアス電圧を増加させる方向に制御すればいいのか、あるいは減少させる方向に制御すればいいのかを、外部光変調器 210 から出力される光信号のパワーに基づいて決定する点だけである。具体的には、現在の光パワーを基準値と比較して、前者が後者よりも大きければ、印加バイアス電圧を増加方向に変化させ、小さければ減少方向に変化させる。

【0088】これに対し、第 1 の実施形態では、印加バイアス電圧を実際に増加方向に変化させてみて、それによる歪量の増減を検出し、その結果を受けて変化方向を決定していた（図 3 参照）。印加バイアス電圧を増加方向に変化させてみた結果、歪量が減少していれば、増加方向の変化を継続して行えばよいが、もし歪量が増加していれば、印加バイアス電圧を最適バイアス電圧から遠ざかる向きに変化させたことになり、その時点で、印加バイアス電圧を変化させる向きを減少方向へと反転しなければならぬ（図 3 中、点線の矢印で示される処理）。そのため、追従に時間がかかる場合があった。

【0089】図 6 は、図 5 のバイアス電圧制御回路 260 が行う処理を記述したフローチャートである。なお、図 3 には、図 1 のバイアス電圧制御回路 150 が行う処理が視覚的に示されている（第 1 の実施形態を参照）が、図 5 のバイアス電圧制御回路 260 が行う処理では、図 3 に一連の矢印で示されている制御処理において、点線の矢印部分の処理が不要となる。つまり、第 1 の実施形態では、印加バイアス電圧を増加方向に変化させてみて、その結果として歪量が増加すれば、その時点で印加バイアス電圧を変化させる向き反転して、印加バイアス電圧を減少方向に変化させる処理を行ったが、本実施形態では、そのような無駄な処理がなくなる。

【0090】図 6 において、バイアス電圧制御回路 260 へは、歪量検出器 240 が検出した歪量 m_0 と、光パワー検出回路が検出した光パワーとが与えられる。バイアス電圧制御回路 260 は、最初、与えられた光パワーを基準値と比較することによって、光パワーが予め決められたしきい値以上変化したか否かを判定する（ステップ S201）。そして、その判定結果が否定の場合、ステップ S207 へと進む。

【0091】ステップ S201 の判定結果が肯定の場合、バイアス電圧制御回路 260 は、光パワーが増加したか否かを判定する（ステップ S202）。その判定結果が肯定の場合、バイアス電圧制御回路 260 は、印加バイアス電圧を、予め決められた電圧だけ増加させる（ステップ S203）。次いで、歪量検出器 240 から、印加バイアス増加後の歪量（ m_1 ）が与えられ、応じて、バイアス電圧制御回路 260 は、印加バイアス増加前後の歪量（ m_0 および m_1 ）を互いに比較することにより、歪量の変化が予め決められたしきい値よりも大きいか否かを判定する（ステップ S204）。その判定結果が否定の場合、ステップ S207 へと進む。

【0092】ステップ S204 の判定結果が肯定の場合、ステップ S203 および S204 が反復して行われる。すなわち、バイアス電圧制御回路 260 は、印加バイアス電圧を再び増加させ、次いで、歪量検出器 240 から与えられる印加バイアス電圧増加後の歪量（ m_2 ）を増加前の歪量（ m_1 ）と比較して、歪量の変化がしきい値よりも大きいか否かを判定する。その判定結果が否定の場合はステップ S207 へと進むが、肯定の場合には、再度、ステップ S203 および S204 が反復して行われることになる。

【0093】ステップ S202 の判定結果が否定の場合、バイアス電圧制御回路 260 は、印加バイアス電圧を、予め決められた電圧だけ減少させる（ステップ S205）。次いで、歪量検出器 240 から、印加バイアス減少後の歪量（ m_1 ）が与えられ、応じて、バイアス電圧制御回路 260 は、印加バイアス減少前後の歪量（ m_0 および m_1 ）を互いに比較することにより、歪量の変化が予め決められたしきい値よりも大きいか否かを判定する（ステップ S206）。その判定結果が否定の場合、ステップ S207 へと進む。

【0094】ステップ S206 の判定結果が肯定の場合、ステップ S205 および S206 が反復して行われる。すなわち、バイアス電圧制御回路 260 は、印加バイアス電圧を再び減少させ、次いで、歪量検出器 240 から与えられる印加バイアス電圧減少後の歪量（ m_2 ）を減少前の歪量（ m_1 ）と比較して、歪量の変化がしきい値よりも大きいか否かを判定する。その判定結果が否定の場合はステップ S207 へと進むが、肯定の場合には、再度、ステップ S205 および S206 が反復して行われることになる。

【0095】ステップS207では、バイアス電圧制御回路260は、印加バイアス電圧を一定期間、現在の値のまま保持する。その後、処理を継続するか否かが判断され（ステップS208）、その判断結果が肯定の場合には、ステップS201に戻って上記と同様の処理が反復して行われ、否定の場合は、処理を終了する。

【0096】バイアス電圧制御回路260が上記のような処理を行うことによって、バイアス電圧印加器205が外部光変調器210に印加するバイアス電圧を、DCドリフトによる最適バイアス電圧の変動に追従させることが可能となる。また、最適バイアスが変動したとき、第1の実施形態と比べ、より素早く追従を開始することができる。

【0097】（第3の実施形態）図7は、本発明の第3の実施形態に係る光送信装置の構成を示すブロック図である。図7において、光送信装置は、光源300と、バイアス電圧印加器305と、外部光変調器310と、光電気変換器320と、歪量検出器330とを備えている。バイアス電圧印加器305は、バイアス電圧制御回路340を含む。光源300、バイアス電圧印加器305、光電気変換器320および歪量検出器330は、図1と同じものであり、説明を省略する。

【0098】外部光変調器310は、図1の外部光変調器110と同様、バイアス電圧印加器305によるバイアス電圧の印加を受けた状態で、光源300から出力される搬送光と、電気信号とが入力され、搬送光を電気信号に応じて強度変調して、光信号を出力する（外部光変調器310に輸入される電気信号は、複数のアナログ信号が周波数多重された信号である）。外部光変調器310が図1の外部光変調器110と異なるのは、第1および第2の2つの出力ポートを持つ点である。第1のポートから出力される光信号は、光伝送路を通じ、図示しない受信装置へと伝送される。第2のポートから出力される光信号は、光電気変換器320へ入力され、光電気変換器320によって電気信号に変換される。

【0099】図8は、図7の外部光変調器310の構成を示す図である。図8に示されているのは、図11の外部光変調器（従来の技術を参照）において、X分岐方向性光結合器20をさらに含むような外部光変調器である。図8において、2つの導波路からの光信号が、X分岐方向性光結合器20に輸入され、そこで相互に結合された後、第1および第2のポートを通じて出力される。このとき第1のポートから出力される光信号と、第2のポートから出力される光信号とでは、一般に、バイアス電圧-歪量特性の位相が互いにずれている。

【0100】図9は、図7の外部光変調器310の第1および第2のポートから出力される各光信号について、初期状態におけるバイアス電圧と歪量との関係を示した図である。図9に示すように、初期状態では、第1のポートから出力される光信号と、第2のポートから出力さ

れる光信号とでは、それぞれの最適バイアス電圧 V_{o1} 、 V_{o2} （ $V_{o1} < V_{o2}$ ）が、互いにある電圧（ $= \Delta V_o$ ）だけ異なっている。

【0101】その後、これら2つの最適バイアス電圧 V_{o1} および V_{o2} は、温度変化等によるDCドリフトに応じて変動する。その際、両電圧の差（ $= V_{o2} - V_{o1}$ ）は、初期状態と同じ一定電圧（ $= \Delta V_o$ ）に保たれている。このとき、ポート2から出力される光信号に生じる歪量が最小となるようにバイアス電圧を制御しても、ポート1から出力されて受信装置へ向かう光信号に生じる歪量は最小とならない。

【0102】印加バイアス電圧が第1のポート側の最適バイアス電圧（ $= V_{o1}$ ）に等しい状態（つまり図9に示される初期状態）において、第2のポートから出力される光信号に生じる歪量がD0であるとする、印加バイアス電圧を第1のポート側の最適バイアス電圧 V_{o1} の変動に追従させるには、第2のポートから出力される光信号に生じる歪量を監視して、その歪量がD0に保たれるように印加バイアス電圧を制御すればよい。なぜなら、2つの最適バイアス電圧 V_{o1} および V_{o2} は、両電圧の差（ $= V_{o2} - V_{o1}$ ）が一定（ $= \Delta V_o$ ）の関係を保ったまま変動するので、第2のポートから出力される光信号に生じる歪量をD0に保てば、第1のポートから出力される光信号に生じる歪量が最小に保たれるからである。

【0103】そこで、バイアス電圧制御回路340は、歪量検出器330から与えられる歪量（すなわち外部光変調器310の第2のポートから出力される光信号に生じる歪量）がD0となるように、バイアス電圧印加器305が外部光変調器310に印加するバイアス電圧を制御する。具体的には、バイアス電圧制御回路340は、歪量検出器330から与えられる歪量をD0と比較して、歪量がD0よりも大きくなった場合には印加バイアス電圧を増加させ、小さくなった場合には印加バイアス電圧を減少させる。

【0104】以上のように構成された光送信装置の動作について、以下に説明する。外部光変調器310は、出力ポートを2つ有している。これら第1および第2のポートから出力される光信号は、理想的には、同一の特性を持つ。しかしながら、実際には、種々の要因によって、第1のポート側の光信号と第2のポート側の光信号との間では、特性に差が生じることが一般的である。

【0105】例えば、図9に示したように、バイアス電圧-歪量特性は、ポート間でずれが生じる。このため、各ポートから出力される光信号に含まれる歪量が最小となるバイアス電圧は、互いに異なる値 V_{o1} および V_{o2} となる。本実施形態では、ポート間でバイアス電圧-歪量特性が異なることを利用して、バイアス電圧の増減を決定する。

【0106】すなわち、第1のポートから出力される光

信号を受信装置側へと伝送し、第2のポートから出力される光信号を、バイアス電圧の制御に使用する。第1のポートから出力される光信号に生じる歪量が最小となるバイアス電圧（第1ポート側の最適バイアス電圧）は、第2ポートから出力される光信号に生じる歪量がD0となるバイアス電圧と一致し、かつ、バイアス電圧が増加するにつれて歪量が単調減少する領域内にある。このため、第2のポートから出力される光信号に生じる歪量を検出してD0と比較することにより、バイアス電圧を増加させるべきか減少させるべきかを瞬時に判断することができる。従って、歪量を監視するだけで、素早くバイアス電圧の調整を行うことができる。

【0107】ここでは、第1のポートから出力される光信号を受信装置側へと伝送し、第2のポートから出力される光信号をバイアス電圧制御に用いる場合について、本光送信装置の動作を説明する。光源300から出力される光は、外部光変調器310に入力される。第1の実施形態で述べたように、外部光変調器310へ入力する光信号は、TEモードもしくはTMモードのどちらか一方だけに制限されるように、偏波面の調整を行うことが一般的である。図9には、この偏波面の調整を行う偏波コントローラや偏波保持ファイバについては、明記されていない。

【0108】外部光変調器310は、バイアス電圧印加器305によりバイアス電圧を印加されており、入力される電気信号に応じて入力光を強度変調し、第1および第2の2つのポートから光信号を出力する。第1のポートから出力された光信号は、光伝送路を通じて受信装置側へと伝送される。

【0109】第2のポートから出力された光信号は、光電気変換器320で電気信号に変換される。光電気変換器320から出力された電気信号は、歪量検出器330に入力される。歪量検出器330は、電気信号に含まれる交流成分から所望の帯域の成分を抽出してそのレベルを測定する機能を有しており、測定したレベルに基づいて所定の演算を行うことにより、外部光変調器310から出力される光信号に生じる歪量を検出する。この所望の帯域は、二次歪が生じる帯域であれば特に限定はしないが、そこで生じる歪量の多い周波数帯域に設定することが望ましい。

【0110】歪量検出器330から出力される信号（第2のポート側の歪量）は、バイアス電圧印加器305内のバイアス電圧制御回路340に入力される。バイアス制御回路340は、第2のポート側の歪量がD0となるように、バイアス電圧印加器305が外部光変調器310に印加するバイアス電圧（印可バイアス電圧）の制御を行う。

【0111】すなわち、図9に示したように、印加バイアス電圧を第2のポート側の歪量が最小となるバイアス電圧に制御した場合、第1のポート側の歪量は最小には

ならない。そこで、第1のポートから出力される光信号に生じる歪量が最小となるバイアス電圧を印加している初期状態において、第2のポートから出力される光信号に生じる歪量D0を事前に測定し、D0の値を記憶しておく。以降、バイアス電圧制御回路340は、第2のポートから出力される光信号に生じる歪量が、記憶している歪量D0と等しくなるように印加バイアス電圧を制御する。このような構成にすることによって、比較的簡単な処理によって、制御精度を向上することが可能となり、印加バイアス電圧を常に、受信装置へと伝送される光信号に生じる歪量が最小となるバイアス電圧（最適バイアス電圧）に保つことが可能となる。

【0112】ここで、上記のバイアス電圧制御処理について、詳しく説明する。この処理は、歪量検出器330から与えられる歪量（すなわち第2のポートから出力される光信号に生じる歪量）がD0（D0は、印加バイアス電圧が第1のポート側の最適バイアス電圧V_{o1}に等しい初期状態において、歪量検出器330から与えられる歪量）となるように印加バイアス電圧を制御することによって、第1ポート側の最適バイアス電圧V_{o2}の変動に印加バイアス電圧を追従させる処理である。

【0113】このように制御すれば、歪量検出器330から与えられる歪量がD0より大きい小さいことによって、印加バイアス電圧を増加させるべきか減少させるべきかを、速やかに判断することができる。すなわち、バイアス電圧制御回路340は、歪量検出器330から与えられる歪量をD0と比較して、歪量がD0よりも大きくなった場合、印加バイアス電圧を増加させ、小さくなった場合には、印加バイアス電圧を減少させればよい。

【0114】これに対し、第1の実施形態では、印加バイアス電圧を実際に増加方向に変化させてみて、それによる歪量の増減を検出し、その結果を受けて、変化方向を決定していた。そのため、追従開始時、印加バイアス電圧を最適バイアス電圧から遠ざかる向きに変化させる可能性があり、追従に時間がかかる場合があった。

【0115】図10は、図7のバイアス電圧制御回路340が行う処理を記述したフローチャートである。図10において、バイアス電圧制御回路340は、最初、第1のポート側の最適バイアス電圧V_{o1}と等しいバイアス電圧を、バイアス電圧印加器305を通じて外部光変調器310に印加する（ステップS301）。そして、このとき歪量検出器330から与えられる歪量D0を記憶する（ステップS302）。

【0116】その後、バイアス電圧制御回路340へは、歪量検出器330が検出した歪量が与えられる。バイアス電圧制御回路340は、最初、与えられた歪量を、ステップS302で記憶した歪量D0と比較することによって、歪量がD0から予め決められたしきい値以上変化したか否かを判定する（ステップS303）。そして、その判定結果が否定の場合、ステップS307へ

10

20

30

40

50

と進む。

【0117】ステップS303の判定結果が肯定の場合、バイアス電圧制御回路340は、歪量が増加したか否かを判定する（ステップS304）。その判定結果が肯定の場合、バイアス電圧制御回路340は、歪量検出器330から与えられる歪量を監視しながら、その歪量がD0に一致するように、印加バイアス電圧を増加させる（ステップS305）。そして、ステップS307へと進む。

【0118】ステップS304の判定結果が否定の場合、バイアス電圧制御回路340は、歪量検出器330から与えられる歪量を監視しながら、その歪量がD0に一致するように、印加バイアス電圧を減少させる（ステップS306）。そして、ステップS307へと進む。

【0119】ステップS307では、バイアス電圧制御回路340は、印加バイアス電圧を一定期間、現在の値のまま保持する。その後、処理を継続するか否かが判断され（ステップS308）、その判断結果が肯定の場合には、ステップS303に戻って上記と同様の処理が反復して行われ、否定の場合は、処理を終了する。

【0120】バイアス電圧制御回路340が上記のような処理を行うことによって、バイアス電圧印加器305が外部光変調器310に印加するバイアス電圧を、温度変化等による第1のポート側の最適バイアス電圧の変動に追従させることが可能となる。また、最適バイアス電圧が変動したとき、第1の実施形態と比べ、より素早く追従を開始することができる。

【0121】なお、この素早い追従開始が可能である点は、第2の実施形態と同じであるが、本実施形態では、歪量検出器330から与えられる歪量がD0（定数）と一致するようにバイアス電圧を制御するので、歪量のみをモニタすればよく、歪み量および光パワーをモニタする第2の実施形態と比べ、装置の構成が単純（制御処理がより簡単）である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る光送信装置の構成を示すブロック図である。

【図2】図1の外部光変調器110から出力される光信号に含まれる二次歪成分と、歪量検出器140に用いられるフィルタの特性の一例とを示す図である。

【図3】図1のバイアス電圧制御回路150が行う処理

を視覚的に示した図である。

【図4】図1のバイアス電圧制御回路150が行う処理を記述したフローチャートである。

【図5】本発明の第2の実施形態に係る光送信装置の構成を示すブロック図である。

【図6】図5のバイアス電圧制御回路260が行う処理を記述したフローチャートである。

【図7】本発明の第3の実施形態に係る光送信装置の構成を示すブロック図である。

10 【図8】図7の外部光変調器310の構成を示す図である。

【図9】図7の外部光変調器310の第1および第2のポートから出力される各光信号について、初期状態におけるバイアス電圧と歪量との関係を示した図である。

【図10】図7のバイアス電圧制御回路340が行う処理を記述したフローチャートである。

【図11】従来の外部光変調器（マッハツェンダー型）の構成を示す図である。

20 【図12】図11の外部光変調器に印加されるバイアス電圧と、その外部光変調器から出力される光信号のパワーとの関係を示す図である。

【図13】図11の外部光変調器で生じるDCドリフト現象を示す図である。

【図14】図11の外部光変調器に印加されるバイアス電圧と、その外部光変調器から出力される光信号に生じる二次歪の量との関係を示す図である。

30 【図15】図11の外部光変調器に印加されるバイアス電圧の位相の、最適バイアス電圧の位相からのずれに対する二次歪（IM2）および複合二次歪（CSO）を計算した結果を示す図である。

【符号の説明】

20 X分岐方向性光結合器

100, 200, 300 光源

105, 205, 305 バイアス電圧印加器

110, 210, 310 外部光変調器

120, 220 光分岐器

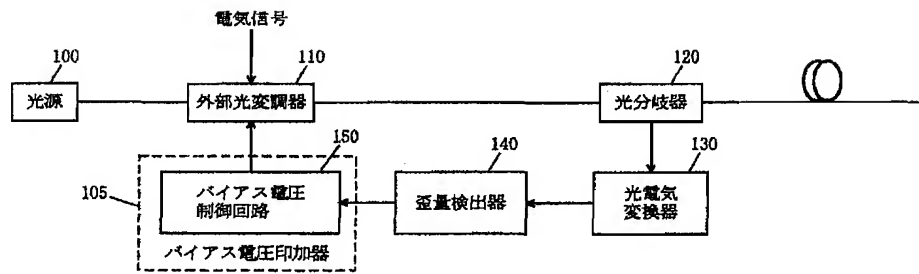
130, 230, 320 光電気変換器

140, 240, 330 歪量検出器

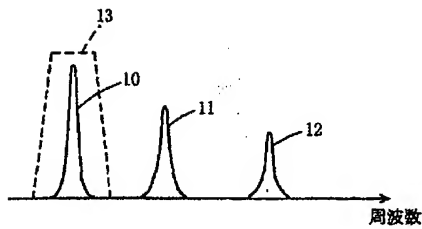
150, 260, 340 バイアス電圧制御回路

40 250 光パワー検出器

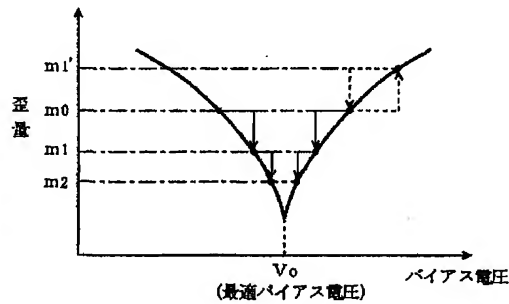
【図1】



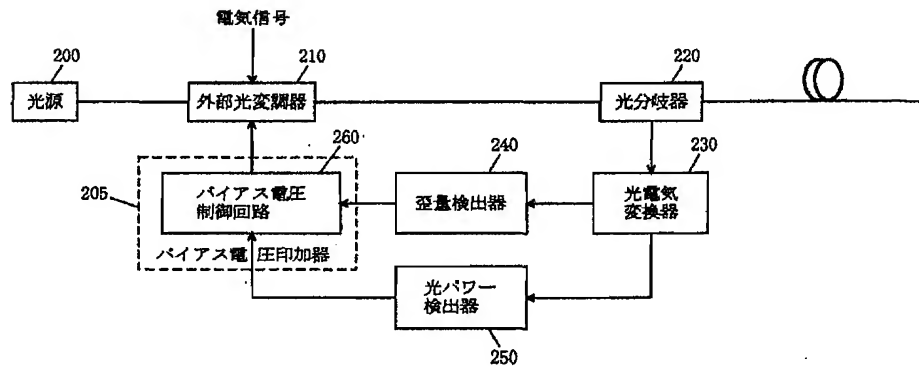
【図2】



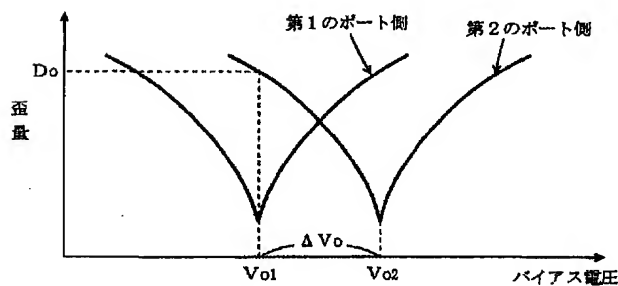
【図3】



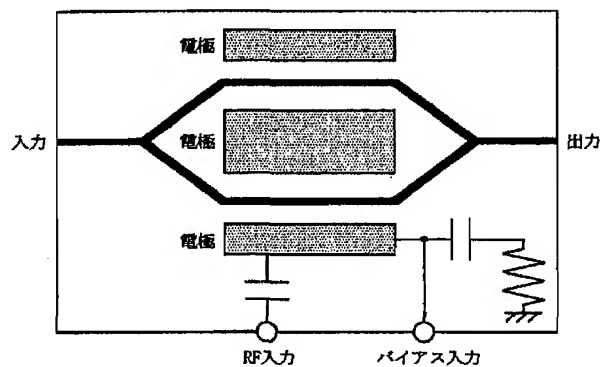
【図5】



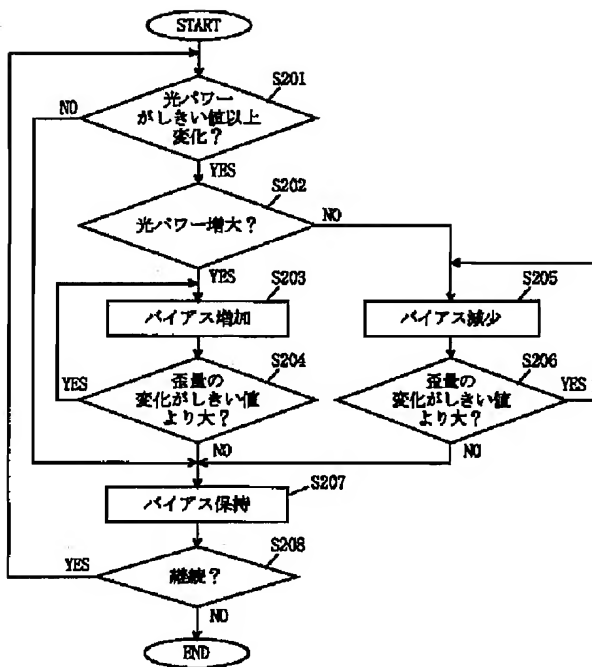
【図9】



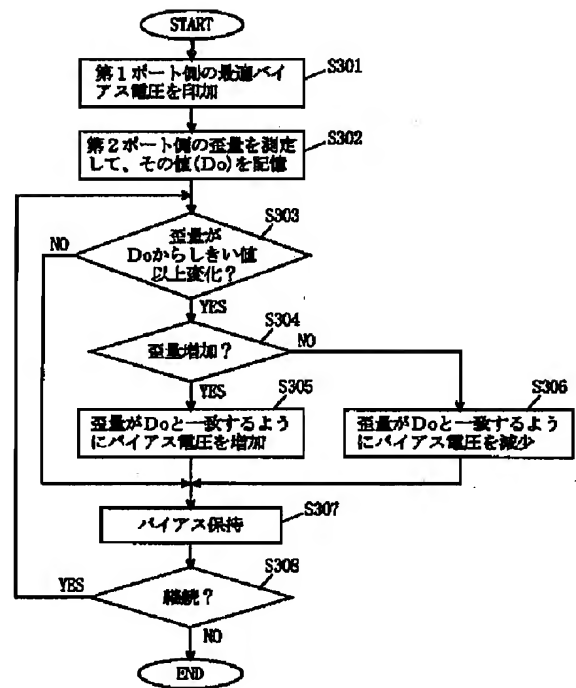
【図11】



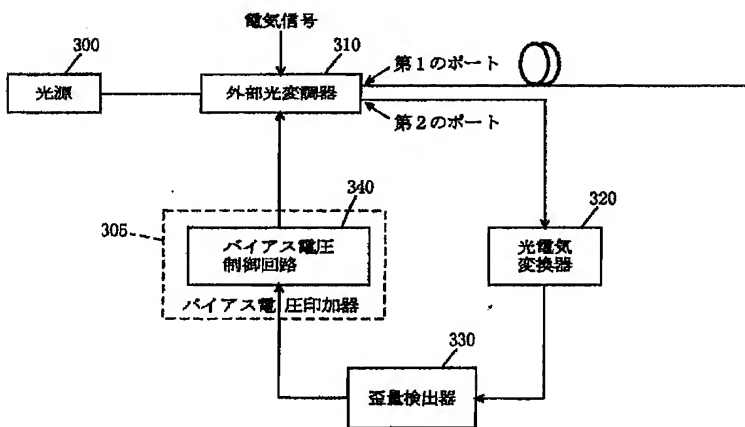
【図6】



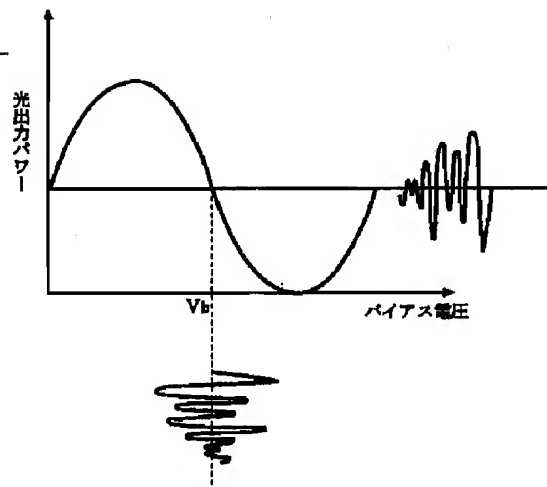
【図10】



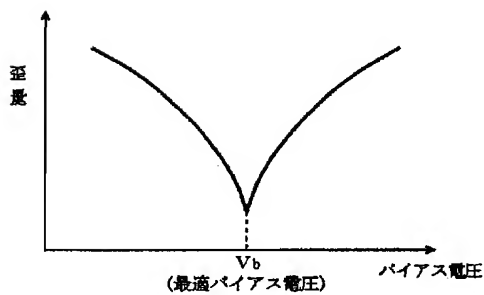
【図7】



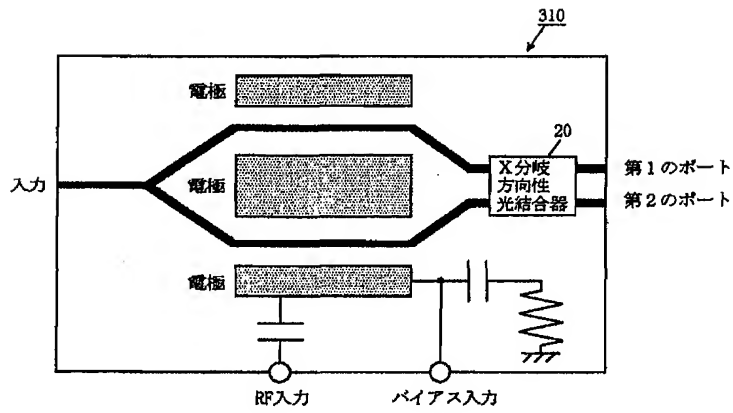
【図12】



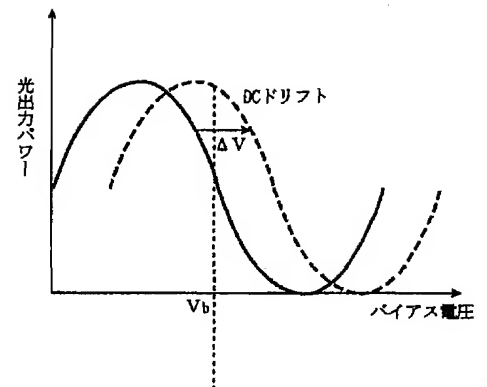
【図14】



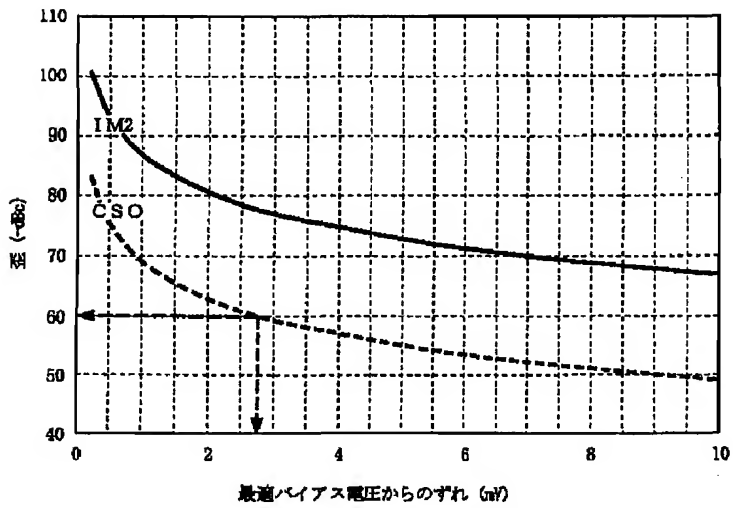
【図8】



【図13】



【図15】



3

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開 2002-33701

(P 2002-33701 A)

(43) 公開日 平成14年1月31日 (2002.1.31)

(51) Int. Cl. 7

識別記号

F I

テークアウト* (参考)

H 0 4 B 10/02
10/18

H 0 4 B 9/00

M 5K002

審査請求 未請求 請求項の数 5

O L

(全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2000-213266 (P2000-213266)

(22) 出願日 平成12年7月13日 (2000. 7. 13)

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号

(72) 発明者 大井 寛己

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 石川 丈二

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 100078330

弁理士 笹島 富二雄

F ターム (参考) 5K002 AA01 AA03 BA02 BA04 CA01

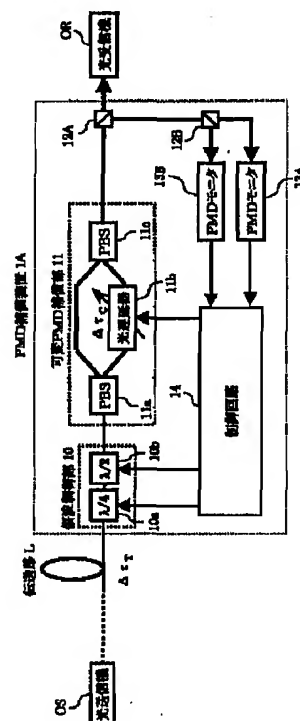
CA13 DA05 FA01

(54) 【発明の名称】 偏波モード分散補償方法および偏波モード分散補償装置

(57) 【要約】

【課題】 信号光に生じた偏波モード分散 (PMD) を広い範囲に亘って高い精度で補償できるようにした PMD 補償方法および PMD 補償装置を提供する。

【解決手段】 本発明の PMD 補償装置 1 A は、伝送路 L から入力される信号光について、2つの偏波モードへの光強度の分岐比 γ を設定する偏波制御部 10 と、2つの偏波モード間に光遅延差 $\Delta \tau_c$ を与える可変 PMD 補償部 11 と、該可変 PMD 補償部 11 から出力される信号光について、周波数 f_1 成分の強度を検出する PMD モニタ 13 A と、周波数 f_2 ($< f_1$) 成分の強度を検出する PMD モニタ 13 B と、PMD モニタ 13 A、13 B の各モニタ強度が検出感度の不確定幅に応じて決まる最大値収束範囲内になるように、偏波制御部 10 および可変 PMD 補償部 11 をフィードバック制御する制御回路 14 とから構成される。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】伝送路の偏波モード分散による信号光への影響を補償する偏波モード分散補償方法において、伝送路を介して入力される信号光に生じた偏波モード分散を補償する偏波モード分散補償ステップと、該偏波モード分散補償ステップで補償された信号光におけるベースバンドスペクトル中の複数の特定周波数成分を抽出する特定周波数成分抽出ステップと、該特定周波数成分抽出ステップで抽出された各特定周波数成分の強度をそれぞれ検出する強度検出ステップと、該強度検出ステップで検出されるすべての特定周波数成分の強度が、検出感度の不確定幅に応じて決まる最大値収束範囲内になるように、前記偏波モード分散補償ステップにおける偏波モード分散補償量をフィードバック制御する補償量制御ステップと、を含んでなることを特徴とする偏波モード分散補償方法。

【請求項 2】前記補償量制御ステップは、相対的に低周波側の特定周波数成分の強度が前記最大値収束範囲内になった後に、相対的に高周波側の特定周波数成分の強度が前記最大値収束範囲内になるように、偏波モード分散補償量のフィードバック制御に用いる特定周波数成分の強度の切り替えを順次行うことを特徴とする請求項 1 に記載の偏波モード分散補償方法。

【請求項 3】伝送路の偏波モード分散による信号光への影響を補償する偏波モード分散補償装置において、伝送路を介して入力される信号光に生じた偏波モード分散を補償する偏波モード分散補償手段と、該偏波モード分散補償手段から出力される信号光におけるベースバンドスペクトル中の複数の特定周波数成分を抽出する特定周波数成分抽出手段と、該特定周波数成分抽出手段で抽出された各特定周波数成分の強度をそれぞれ検出する強度検出手段と、該強度検出手段で検出されるすべての特定周波数成分の強度が、検出感度の不確定幅に応じて決まる最大値収束範囲内になるように、前記偏波モード分散補償手段における偏波モード分散補償量をフィードバック制御する補償量制御手段と、を備えて構成されたことを特徴とする偏波モード分散補償装置。

【請求項 4】前記補償量制御手段は、相対的に低周波側の特定周波数成分の強度が前記最大値収束範囲内になった後に、相対的に高周波側の特定周波数成分の強度が前記最大値収束範囲内になるように、前記偏波モード分散補償手段における偏波モード分散補償量のフィードバック制御に用いる特定周波数成分の強度の切り替えを順次行うことを特徴とする請求項 3 に記載の偏波モード分散補償装置。

【請求項 5】前記偏波モード分散補償手段は、前記信号光について、2つの偏波モードへの光強度の分岐比を決

定する偏波制御部と、2つの偏波モード間に光遅延差を与える光遅延部とを有し、前記偏波制御部の分岐比および前記光遅延部の光遅延差の組み合わせに応じて偏波モード分散補償量が設定されることを特徴とする請求項 3 に記載の偏波モード分散補償装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、伝送路の偏波モード分散による信号光への影響を補償する技術に関し、特に、信号光におけるベースバンドスペクトル中の特定周波数成分の強度を検出して偏波モード分散の補償を行う偏波モード分散補償方法および偏波モード分散補償装置に関する。

【0002】

【従来の技術】現在、日本国内や国外において、伝送速度 10Gb/s (ギガビット/秒) の光伝送システムの商用化が進められている。また、今後のインターネット等による伝送容量需要の急速な増大に対応し、安価で周波数利用効率の高い通信サービスを提供するために、例えば、伝送速度が 40Gb/s などの超高速光伝送システムの実現が求められている。

【0003】しかしながら、上記のような超高速光伝送システムにおいては、伝送路で生じる偏波モード分散 (Polarization-mode Dispersion: 以下、PMD とする) などの影響により信号光の伝送波形が劣化してしまうため、信号光の伝送距離が制限されるという課題がある。この PMD は、信号光における偏波成分 (例えば TE モードおよび TM モードのような 2 つのモード光) の伝播遅延時間が異なることによって生じる分散であり、あらゆる光ファイバに対して起こり得るものである。

【0004】したがって、超高速の長距離光伝送を実現するためには、PMD 補償技術の適用が必須となる。また、PMD は、温度やストレス等の伝送路環境の変化によっても経時的に変動するため、システム運用中に PMD の状態をモニタし、フィードバック制御を行う自動 PMD 補償技術が必要とされる。

【0005】従来の自動 PMD 補償技術としては、例えば、光領域での補償方式 (例えば、T. Takahashi et al., Electron. Lett. 30, pp. 348-349, 1994. や、F. Heismann et al., ECOC'98 Technical Digest, pp. 529-530. や、特開平 11-196046 号公報等参照) および電気段での補償方式 (例えば H. Bulow, NOC'97 Technical Digest, pp. 65-72. 等参照) の報告がなされている。

【0006】また、本発明者らは、簡易な構成、変調方式や他の波形劣化要因 (波長分散、非線形効果) に無依存、高速化に有利、といった観点から、光領域における補償方式を採用した自動 PMD 補償技術を提案している (特願平 11-515959 号や、H. Ooi et al., OFC'99, Technical Digest WE5 pp. 86-88, 1999. 等参照)。この補償技術は、大規模な測定器を不要とする簡易な構成の PM